

文章编号:1004-7220(2020)06-0692-06

椭圆交叉训练机锻炼时人体生物力学与动力学特点

孙朝阳, 何育民, 郭超, 郭思宇

(西安建筑科技大学 机电工程学院, 西安 710055)

摘要:目的 分析椭圆交叉训练机锻炼过程中人体生物力学与动力学特性。方法 通过三维建模软件建立一种椭圆交叉训练机模型,在 AnyBody 软件中建立人体骨肌模型,然后将人体骨肌模型与椭圆交叉训练机模型进行耦合仿真。结果 在椭圆交叉训练机锻炼过程中,躯干部位中腰椎 L5 受作用力最大达到 1.023 kN,腹外斜肌和腹内斜肌激活程度最大分别为 80% 和 40%。下肢肌群中肌肉最大激活程度均未超过 40%,且地面给予足底的最大反作用力为 600 N。结论 人体使用椭圆交叉训练机进行锻炼可以缓解慢性腰痛患者疼痛,有助于提高脑卒中偏瘫患者躯干控制能力及平衡功能。对比跑步锻炼,使用椭圆机交叉训练机锻炼能起到保护人体膝关节的作用。

关键词:椭圆交叉训练机;骨肌;力学模型;肌肉激活度

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2020.06.007

Biomechanical and Dynamic Characteristics of Human Body during Exercise on Elliptical Cross Trainer

SUN Zhaoyang, HE Yumin, GUO Chao, GUO Siyu

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Objective To analyze the biomechanical and dynamic characteristics of human body during exercise on elliptical cross trainer. **Methods** An elliptical cross trainer model and a human skeletal muscle model were built by three-dimensional (3D) modeling software and AnyBody software, respectively, which were then coupled and simulated. **Results** During exercise on elliptical cross trainer, the lumbar spine L5 was subjected to the maximum force 1.023 kN, and the maximum activation of external oblique and internal oblique muscles were 80% and 40%, respectively. The maximum muscle activation in lower limb muscle groups did not exceed 40%, and the maximum plantar ground reaction force was 600 N. **Conclusions** The use of elliptical cross trainer can alleviate the pain of patients with chronic low back pain, and help to improve the trunk control and balance function of patients with stroke and hemiplegia. Compared with running exercise, exercise on elliptical cross trainer can protect the human knee joint.

Key words: elliptical cross trainer; skeletal muscle; mechanical model; muscle activation

收稿日期:2019-12-30;修回日期:2020-02-27

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2014JM7269)

通信作者:何育民,副教授,E-mail: he_yumin@163.com

随着人民生活水平的不断提高,全国范围内普遍兴起了体育运动与健身健身的热潮,健身器材也越来越多样化。椭圆交叉训练机(简称椭圆机)是目前健身房最受欢迎的健身器材之一。椭圆机是利用人体慢走、快走和跑步时,脚踝运动轨迹近似于椭圆形的原理,通过一定的机构使踏板以椭圆轨迹进行运动,这与人的自然跨步相吻合^[1]。正确使用椭圆机的方法是:双手轻握器械上方的扶手;手随着脚依次向前进行蹬踏运动;等手脚的运动达到比较协调的程度后,再逐渐增加手的推力和拉力。使用椭圆机进行锻炼是一种低冲击和低强度的有氧锻炼方式,可以减少膝关节的冲击力,适用人群范围很广,尤其适合肥胖人群的使用^[2]。人体经常使用椭圆机进行锻炼可协调四肢、健美身材、提高身体耐力、锻炼心肺功能,还能平和心态和提高运动能力。

近年来,国内外研究学者也有从生物力学角度分析在运动过程中人体的肌肉激活程度和关节运动的受力变化情况。Banerjee 等^[3]研究人体在 ProFitter3-D 交叉训练机上运动,通过表面肌电图获得躯干和髋部的肌肉激活程度。Harrison 等^[4]探讨一种改良的椭圆机训练对下肢运动力学的影响。Siekirk 等^[5]分析人体在跑台与斜卧交叉训练机锻炼时对慢性卒中后步态和腿部肌电的影响。张峻霞等^[6]探究穿戴式下肢外骨骼对人体下肢相应关节参数与肌肉运动学、动力学参数的影响。袁爱国等^[7]通过实验验证,椭圆机高强度间歇训练与有氧训练均能有助于提高患者的药疗疗效,改善糖脂代谢,提高其体质健康水平。罗林聪等^[8]利用人体骨肌系统软件建立志愿者个性化上肢的骨骼肌肉运动力学模型,模拟正常人肘关节屈曲运动,推导出推肱骨在屈曲运动过程中所受肌肉力、关节力、力矩及约束条件,作为有限元分析的边界条件。徐欢欢等^[9]通过建立人体骨肌系统的三维模型,分析正常步态下比目鱼肌、缝匠肌、胫骨后肌和胫骨前肌在步态周期内的肌肉力和肌肉活性变化曲线,讨论肌肉力和肌肉活性之间的关系。曲倩倩^[10]研究了志愿者在椭圆机上行走时下肢 9 块肌肉在 6 个不同坡度间的不同放电模式,探索椭圆机不同坡度和不同肌肉对人体下肢肌肉表面肌电时域特征的影响。

本文利用 AnyBody 软件建立人体在椭圆机上锻炼时的耦合模型,并通过逆向动力学方法获得人体锻炼过程中腰腹部肌肉激活程度、骨骼和脊椎不同部位的受力、下肢主要肌群肌肉的激活程度和主要关节受力变化情况,以期为人们科学地使用椭圆机进行锻炼和康复提供一定参考。

1 人体在椭圆机上锻炼时的耦合模型的建立

在 AnyBody 软件中,1 个完整模型包括 4 个部分: Human Model、Environment、Mannequin 和 Model Environment Connection。人体使用椭圆机进行训练模型包括两部分:人体骨骼肌肉模型和椭圆机机械模型。在 Human Model 文件夹中应用 AnyScript 编程语言建立人体模型,设置人体模型的比例缩放尺寸(身高 175.0 cm,体质量 75.0 kg)。在 SolidWorks 软件中建立椭圆机模型,模型由手杆、支架、踏板、滚轮以及摇臂杆 1、2、3 共计 5 个部分组成。将椭圆机三维模型保存成 STL 格式(ascii 类)。将具有 1 个自由度的椭圆机模型导入 AnyBody 中,设置运动驱动器来确定每个时间步长的单自由度位置,在此设置滚轮的角度。将此驱动程序和椭圆机模型放置到 Environment 文件夹中。在 Mannequin 中设置约束:① 将双足固定到踏板上;② 将手掌与椭圆机手杆相连接;③ 骨盆-胸部旋转被驱动到固定值;④ 髋关节外展固定在初始条件值;⑤ 胸骨-锁骨关节角度固定在其初始条件值;⑥ 孟肱外展固定在初始条件值。最后通过 Model Environment Connection 将 Human Model 和 Human Model 相连接,模型耦合完成。人体在使用椭圆机进行锻炼的两种状态如图 1 所示。

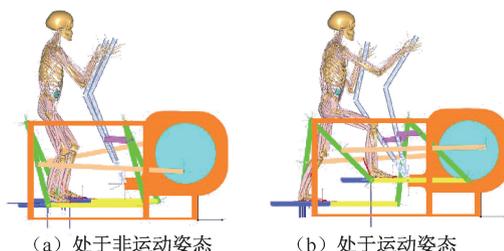


图 1 人体使用椭圆交叉机锻炼模型
Fig.1 Human body exercise model using elliptical cross machine (a) Training mannequin in non-exercise posture, (b) Training mannequin in motion pose

对人体使用椭圆机进行锻炼的运动周期进行精准划分,可以排除不同人体尺寸仿真实验间的差异性,重新定义1个完整的运动周期为100%,从右足开始上移(0%时刻)→右足到达极限高度位置(25%时刻)→右足恢复到初始位置(50%时刻)→右足向后运动到达极限位置(75%时刻)→右足恢复到初始位置(100%时刻),过程为1个完整的运动周期。

2 锻炼时腰腹部肌肉激活程度和下肢受力特性分析

在椭圆机上锻炼时,人体背部、腰腹部和腿部肌肉具有协同作用。由于静力和动力的双重作用,人体肌腱组织会受到拉伸或挤压的影响,使得肌肉活动量增大。本文采用肌肉激活程度来表示人体肌肉的受力情况。肌肉激活程度是指肌肉受力与其肌肉力量强度的比值,反映了人体肌肉在受到外界环境作用力下肌肉的利用强度^[11-12]。肌肉激活程度为0,表示人体肌肉没有被利用;肌肉激活程度为1,表示人体肌肉全部被利用。当其值超过1时,表示人体肌肉活动已经超出极限值,处于过劳状态,长时间处于此状态的肌肉可能受损。较低的肌肉激活程度可以看作不易诱发肌肉疲劳;相反,较高的肌肉激活程度可以看作容易诱发肌肉疲劳。

2.1 人体腰腹部肌肉激活程度和受力分析

人体脊椎由颈椎、胸椎、腰椎和骶4个部分构成。直立时,整个脊椎呈现S型,为脊柱的正常生理弯曲。当人体骨肌模型在椭圆机上锻炼时,进行逆向动力学仿真,可以得到脊椎主要关节作用力曲线。人体使用椭圆机锻炼时,以50%时刻为分界点,人体脊椎受作用力呈现规律性。当右足达到极限位置高度时(25%时刻),人体脊椎受作用力达到最大。当右足向后运动到极限位置时(75%时刻),人体脊椎受作用力达到最大。脊椎受力是从胸椎T12处开始到腰椎L5处逐渐增大,且在腰椎部位L5处受力达到最大为1.023 kN(见图2)。在临床上,慢性腰痛主要是由于患者腰、背肌肉功能下降导致活动功能障碍,常伴有疼痛情况,严重降低患者的生活质量^[13]。研究表明,腰部深层多裂肌对腰椎L4、L5段稳定性的贡献高达2/3,而多裂肌是腰椎最强的稳定器^[14]。慢性腰痛患者的多裂肌变化

非常明显,许多慢性腰痛患者新发腰痛在数天内即会出现多裂肌萎缩,慢性椎体疾病同样可以导致多裂肌萎缩^[15-16]。人体使用椭圆机锻炼时,由于浅层的多裂肌参与腰椎伸展和旋转动作,深层的多裂肌提高脊椎运动的稳定性,深、浅层作用使得多裂肌受到刺激,促使其恢复正常功能,从而缓解疼痛。

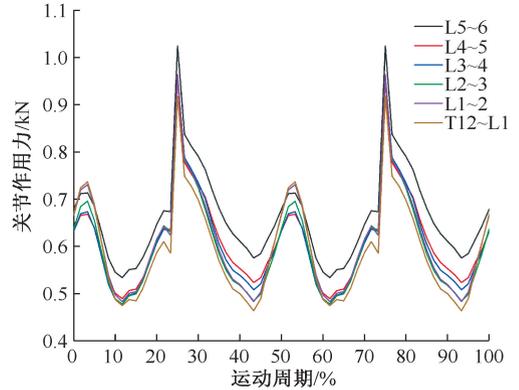


图2 人体位于椭圆机上时脊椎主要关节作用力曲线

Fig.2 Force curves of the main spine joints for human body on an elliptical trainer

人体使用椭圆机进行锻炼是一种四肢联动的锻炼方式,而躯干肌是四肢活动的基础。在运动过程中,上身躯干主要涉及的肌肉包括腹横肌、棘肌、多裂肌、竖脊肌、腰大肌、腰方肌、腹外斜肌和腹内斜肌。在运动周期25%时刻,右足运动到极限位置高度且处于屈髋阶段,腹外斜肌激活程度由9%迅速上升到80%,后随着右足高度的缓慢下降,腹外斜肌的激活程度急剧下降直至为0。运动周期40%时刻后,腹外斜肌激活程度变化不大。在运动周期75%时刻,右足向后运动到极限位置且处于伸髋阶段,腹内斜肌激活程度从之前的0迅速上升到40%,后随着右足缓慢向前运动,腹内斜肌的激活程度急剧下降直至为0(见图3)。这是因为腹外斜肌、腹内斜肌和腹横肌的主要作用是增加腹压、脊柱前屈和旋转躯干,在锻炼过程中运动幅度较为剧烈,激活程度变化最为剧烈。Gardner等^[17]研究认为,腹内斜肌和腹外斜肌即为躯干旋转肌,也是拮抗肌,同时收缩对腰椎起稳定作用。在临床上,脑卒中会使患者大脑出现局灶性神经功能缺损,引发肢体偏瘫、吞咽、语言及心理等多种功能障碍,对患者日常生活能力和社会功能造成严重影响^[18]。竖脊肌、多裂肌、腰方肌、棘肌等躯干肌肉在整个运动

过程中激活程度约为 20%, 不易引发肌肉疲劳, 是人体维持平衡能力的主动稳定系统。因此, 对于脑卒中患者进行躯干强化锻炼对改善平衡能力具有重要的意义^[19]。就脑卒中患者后期康复训练而言, 四肢联动时, 患侧和健侧同时进行锻炼, 效果比单纯对偏瘫侧肢进行锻炼的效果更好^[20]。患者双脚置于四肢联动踏板上, 刺激了患者的本体感受器, 有助于增强偏瘫侧本体感觉输入, 增强患侧膝关节的控制和稳定性, 改善患者下肢的运动功能和感知功能^[21]。这种增强本体感觉训练可以提高肌肉的协调能力, 提高脑卒中偏瘫患者躯干控制能力及平衡功能^[22]。

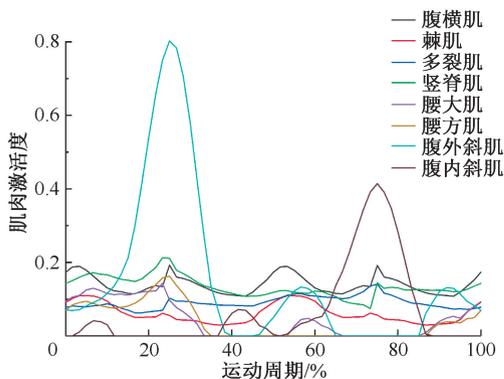


图3 锻炼者躯干肌肉激活程度
 Fig.3 Activation of trunk muscles for the exerciser

2.2 人体下肢肌肉激活程度和受力分析

由人体下肢肌肉激活程度仿真结果可知, 肌肉激活程度随着双脚踩在脚踏板上做周期性的上下运动的变化而变化(见图4)。

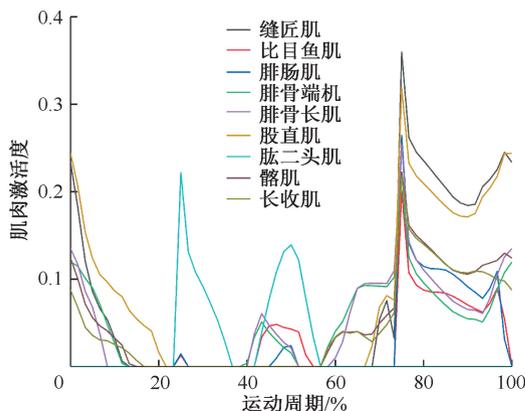


图4 锻炼者腿部肌肉激活程度
 Fig.4 Activation degree of limb muscles for the exerciser

以右足为例进行解释说明, 因为左右足上下移动先后顺序原因, 左右足激活程度曲线有 50% 运动周期的相位差, 但曲线整体最大激活程度与最小激活程度一致。人体在椭圆机上处于非运动姿态时, 股直肌、缝匠肌、腓骨长肌等肌肉维持身体平衡直立。当右足开始慢慢上移时, 这些肌肉激活程度减弱, 说明受力也在逐渐减小。当右足上升到极限高度时(25%时刻), 缝匠肌等大部分肌肉激活程度为 0, 表明此时肌肉处于不受作用力状态, 可能因为股二头肌与膝关节弯曲有关, 导致股二头肌的激活程度从 0% 突增至 23%, 后随着膝关节弯曲角度恢复正常, 股二头肌激活程度下降。当两脚掌高度慢慢平齐时(50%时刻), 股二头肌肌肉激活程度再次达到峰值但低于第 1 次峰值, 腓骨长肌、腓骨短肌、比目鱼肌等也有短暂的肌肉激活程度变化。右足向后运动到极限位置时(75%时刻), 大部分肌肉处于拉伸状态, 肌肉到达激活程度峰值, 缝匠肌最高, 激活程度为 35%, 股直肌其次, 激活程度为 32%。腓肠肌、比目鱼肌达到 25% 左右, 其余肌肉激活程度为 20% 左右。右足慢慢前移, 大部分肌肉激活程度缓慢下降。

人体在椭圆机上锻炼, 当右足运动到极限高度时, 膝关节处于最大弯曲角度, 除股二头肌外, 其他肌肉激活程度处于一个很低的水平, 可认为几乎不受力。股二头肌的最大激活程度在 25% 以下, 不易诱发肌肉疲劳, 也不易诱发肌肉损伤。当右足向后运动到极限位置时, 下肢肌肉处于拉伸状态, 大部分肌肉激活程度普遍上升到最大激活程度, 但均未超过 40%, 不易诱发肌肉疲劳, 也不易诱发肌肉损伤。

图 5 所示为人体在椭圆机上锻炼过程时, 髌、膝、踝关节在各个运动周期所受作用力情况。3 个关节的内外侧力和前后侧力变化比较平缓, 原因是其内外侧和前后侧距离固定且运动形式类似。由于远近侧力是相对与关节位置远近不定, 当 3 个关节以相同的速度运动时, 远近侧力不同点的加速度不同。根据牛顿第 2 定律可知, 3 个关节的远近侧力不同, 变化比较剧烈。在运动周期 25% 时刻, 髌关节远近侧力比膝、踝关节远近侧力变化大很多, 说明此刻髌关节附近肌肉激活程度高于膝、踝关节附近肌肉激活程度。在运动周期 75% 时刻, 3 个关

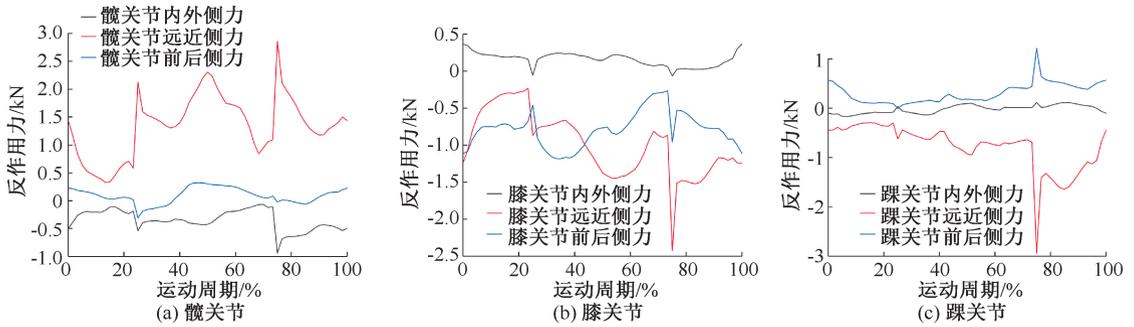


图5 下肢关节反作用力曲线

Fig.5 Reaction force curve of lower limb joints (a) Hip joint, (b) Knee joint, (c) Ankle joint

节附近肌肉由于拉伸,导致远近侧力变化都比较明显,肌肉激活程度都处于一个较高的水平,但这些肌肉的激活程度都低于40%,不易诱发肌肉疲劳,也不易诱发肌肉损伤。

在跑步过程中,人体将会承受2.5~3.0倍自身体质量的地面反作用力,过量和重复的机械负荷作用于人体组织,是导致跑步运动损伤发生的重要机制^[23]。在跑步的运动损伤中,50%~75%损伤是由于过劳性损伤导致^[24]。最常见的损伤部位是膝部,其次是踝部和足部。一份针对4 006名有跑步习惯的不同水平业余跑步人员的研究报告显示,跑步者跑步损伤率(62.06%)较高,损伤高发部位是膝部(31.07%)和踝部(24.21%)^[25]。

由图6可知,当人体站立于椭圆机上时,踏板给予足底的反作用力为237 N。当到达运动周期25%时刻,踏板给予足底的反作用力为133 N。当右足运动到周期60%时刻,踏板给予足底的最大反作用力为600 N。相比于跑步运动,人体使用椭圆机进行锻炼时,踏板给予足底的反作用力远小于

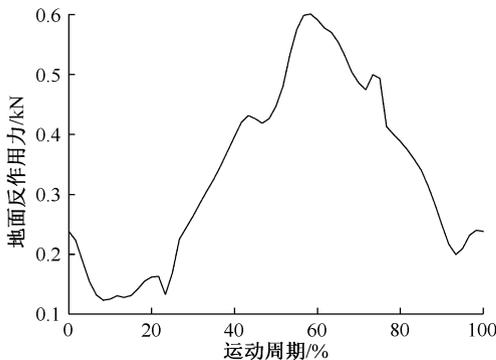


图6 足底地面反作用力曲线

Fig.6 Curve of plantar ground reaction force

2.5~3.0倍自身体质量的地面反作用力。综上所述可知,相比较跑步锻炼来说,使用椭圆机锻炼能降低人体由于运动而对膝关节产生的强烈冲击作用,很好地保护膝关节,不易诱发损伤。

3 结论

本文通过建立人体在椭圆机上锻炼的耦合模型,分析人体在使用椭圆机锻炼时躯干部分脊椎受力及相关肌肉激活程度,以及下肢关节、肌肉受力与肌肉激活程度的变化。结果表明,人体使用椭圆机进行锻炼可以缓解慢性腰痛患者疼痛,同时有助于提高脑卒中偏瘫患者躯干控制能力及平衡功能。对比跑步锻炼,使用椭圆机锻炼能起到保护人体膝关节的作用。

参考文献:

- [1] 王晓光,武永强.考虑人因工程学的椭圆机设计[J].工程图学学报,2007,28(1):123-128.
- [2] 刘金平,刘忆冰,于森.常见动态健身对男青年身体成分的影响——以椭圆机、动感单车、跑步机健身为例[J].当代体育科技,2014,4(29):9-11.
- [3] BANERJEE P, BROWN SHM, HOWARTH SJ, *et al.* Torso and hip muscle activity and resulting spine load and stability while using the ProFitter 3-D cross trainer [J]. J Biomech,2009,25(1):73-84.
- [4] HARRISON K, MILLER E, PIDCOE P, *et al.* Effects of training with a modified elliptical trainer on lower extremity mechanics during running [J]. Med Sci Sport Exerc, 2016, 48(5S Suppl 1): 1072.
- [5] SIEKIRK N, LAI Q, PARDO V, *et al.* Effect of treadmill vs. recumbent cross trainer on gait and leg electromyography after chronic stroke [J]. Med Sci Sport Exerc, 2019, 51(6 Suppl): 348.

- [6] 张峻霞,蔡运红,刘琪,等. 穿戴式下肢外骨骼对人体步态特性的影响研究 [J]. 生物医学工程学杂志, 2019, 36(5): 785-794.
- [7] 袁爱国,雷雨,谭万寿,等. 椭圆机高强度间歇训练与有氧训练对T2DM患者糖脂代谢与体质指标的影响 [J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2019, 16(4): 77-82.
- [8] 罗林聪,马立敏,林泽,等. 基于AnyBody骨骼肌肉多体动力学分析的有限元仿真 [J]. 医用生物力学, 2019, 34(3): 237-242.
- LUO LC, MA LM, LIN Z, et al. Finite element simulation of Anybody-based musculoskeletal multi-body dynamics [J]. J Med Biomech, 2019, 34(3): 237-242.
- [9] 徐欢欢,何育民,孙朝阳,等. AnyBody环境下人体步态的逆向动力学研究 [J].机械科学与技术, 2019, 38(12): 1819-1824.
- [10] 曲倩倩. 椭圆机不同坡度对下肢肌肉表面肌电时域特征的影响[D]. 常州: 江苏大学, 2017.
- [11] 高振海,高菲,胡宏宇,等. 车辆驾乘人员不同坐姿时腰腹部骨肌力学特性分析 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(1): 35-41.
- [12] 刘书朋,司文,闫壮志,等. 基于Anybody技术的人体运动建模方法 [J]. 生物医学工程进展, 2010, 31(3): 131-134.
- [13] 张佳宁,胡天琳. 瑜伽在慢性腰痛患者中的应用效果的系统评价 [J]. 解放军护理杂志, 2016, 33(10): 7-12.
- [14] O' SULLIVAN PB, GRAHAMALAW KM, KENDELL M, et al. The effect of different standing and sitting postures on trunk muscle activity in a pain-free population [J]. Spine, 2002, 27(11): 1238-1244.
- [15] HU ZJ, HE J, ZHAO FD, et al. An assessment of the intra-and inter-reliability of the lumbar paraspinal muscle parameters using CT scan and magnetic resonance imaging [J]. Spine, 2011, 36(13): 868-874.
- [16] 陈威焯,王宽,元唯安,等. 腰骶部多裂肌与腰椎间盘突出症关系的研究进展 [J]. 中国骨伤, 2016, 29(6): 581-584.
- [17] GARDNER M, STOKES L. The effects of abdominal muscle co-activation on lumbar spine stability [J]. Spine, 1998, 23(17): 86-92.
- [18] 刘冬,王崇,王建国. 阶段性康复训练联合心理指导对急性缺血性卒中预后影响 [J]. 西南国防医药, 2018, 28(2): 179-181.
- [19] 李辉,李岩,顾旭东,等. 强化躯干肌联合上下阶梯训练对脑卒中患者平衡及下肢功能的影响 [J]. 中华物理医学与康复杂志, 2013, 35(5): 426-427.
- [20] STAINES WR, MCILROY WE, RAHAM SJ, et al. Bilateral movement enhances ipsilateral cortical activity in acute stroke: A pilot function MRI study [J]. Neurology, 2001, 56(3): 401-404.
- [21] 毛利军,陈世宏,冯炜珍,等. 四肢联动配合康复训练治疗脑卒中膝过伸临床观察 [J]. 浙江中西医结合杂志, 2016, 26(1): 52-54.
- [22] 吴鸣,倪朝民,刘孟,等. Swiss球躯干功能训练对恢复早期脑卒中偏瘫患者平衡及步行功能的影响 [J]. 中华物理医学与康复杂志, 2016, 38(3): 183-186.
- [23] 张雨,王琳. 不同地面对跑步下肢运动生物力学的影响 [J]. 医用生物力学, 2018, 33(6): 577-580.
- ZHANG Y, WANG L. Influences on sports biomechanics of lower extremities during running on different surfaces [J]. J Med Biomech, 2018, 33(6): 577-580.
- [24] TAUNTON JE, RYAN MB, CLEMENT DB, et al. A retrospective case-control analysis of 2002 running injuries [J]. Br J Sports Med, 2002, 36(2): 95-101.
- [25] 杨一卓. 业余跑者跑步损伤危险因素调查及长距离跑后足弓疲劳与纠正效果[D]. 北京: 北京体育大学, 2018.